Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Design and Fabrication of Reduced Graphene Oxide-Based Field-Effect Transistors for Ultrasensitive Sensors

Saeid Masoumi

Department of Electrical Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

UNCORRECTED PROOF

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:
Ultra-sensitive sensor;
Reduced graphene oxide (rGO);
Current modulation;
Dirac point;
pH sensing;
RDX detection;

ABSTRACT

Reduced graphene oxide-based field-effect transistors (rGO-FETs), due to their high surface activity, intrinsic bipolar behavior, and direct sensitivity to surface interactions, provide an efficient platform for ultrasensitive chemical and biological sensors. In this study, rGO channels were fabricated on Si/SiO_2 substrates using a solution-based spin-coating method. The structural quality of the rGO sheets was confirmed by Raman spectroscopy and SEM, demonstrating their high uniformity and structural integrity. Electrical characterization of the devices revealed stable bipolar behavior, minimal hysteresis, and ohmic contacts between Cr/Au electrodes and the rGO channel, ensuring effective modulation of the drain current by the gate voltage. The sensing performance of the rGO-FETs was evaluated against pH variations and RDX molecules; results showed significant $\Delta I_DS/I_DS0$ changes with high reproducibility, and a concentration-dependent Dirac point shift, primarily arising from local electrostatic fields generated by the surface interactions of rGO with RDX molecules, rather than structural changes or true channel doping. Comparative analysis with previous studies indicates that the simple solution-based approach, without functionalization or complex bio-receptors, enables the fabrication of uniform channels with stable electrical performance and reliable sensing response. Compared to more complex previous methods, this approach is simpler, more scalable, and holds great potential for developing ultrasensitive sensors with high reproducibility and reliable performance.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author. Saeid Masoumi**
E-mail address: Saeid.masoumi@iau.ac.ir

How to cite this article:

مقاله پژوهشی

طراحی و ساخت ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر اکسید گرافن احیاشده برای حسگرهای فوق حساس

سعید معصومی

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله:
بازنگری مقاله:
پذیرش مقاله:

واژگان کلیدی:
حسگر فوق حساس،
اکسید گرافن احیا شده،
مدولاسیون جریان،
نقطه دیراک،
حسگری pH،
شناسایی RDX،

چکیده

ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر اکسید گرافن احیاشده (rGO-FETs) به دلیل سطح فعال بالا، رفتار دوقطبی ذاتی و حساسیت مستقیم به برهم‌کنش‌های سطحی، پلتفرمی مناسب برای حسگرهای شیمیایی و زیستی فوق‌حساس محسوب می‌شوند. در این پژوهش، کانال‌های rGO با استفاده از روش محلول‌محور و اسپین‌کوتینگ بر روی زیرلایه‌های Si/SiO_2 ساخته شدند. کیفیت ساختاری شیت‌های rGO با طیف‌سنجی رامان و میکروسکوپی SEM تأیید شد، که یکنواختی و انسجام ساختاری بالای آن‌ها را نشان می‌دهد. مشخصه‌های الکتریکی دستگاه‌ها رفتار دوقطبی پایدار، هیسترزیس بسیار کم و تماس‌های اهمی مناسب بین الکترودهای Cr/Au و کانال rGO را نشان داد، که مدولاسیون مؤثر جریان درین توسط ولتاژ گیت را تضمین می‌کند. عملکرد حسگری rGO-FET ها در برابر تغییرات pH و مولکول RDX مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که تغییرات $\Delta I_{DS}/I_{DS0}$ قابل توجه و با تکرارپذیری بالایی است و شیفت نقطه دیراک وابسته به غلظت رخ می‌دهد، پدیده‌ای که عمدتاً ناشی از میدان‌های الکترواستاتیکی موضعی ایجاد شده توسط برهم‌کنش‌های سطحی rGO با مولکول‌های RDX است، نه تغییر ساختاری یا دوپینگ واقعی کانال. مقایسه تطبیقی با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که روش محلول‌محور ساده و بدون نیاز به عامل‌دارکردن یا گیرنده‌های زیستی پیچیده، امکان تولید کانال‌های یکنواخت با عملکرد الکتریکی پایدار و پاسخ حسگری قابل اعتماد ایجاد می‌کند. در مقایسه با روش‌های پیچیده پیشین، این رویکرد ساده‌تر و مقیاس‌پذیرتر است و پتانسیل بالایی برای توسعه حسگرهای فوق‌حساس با تکرارپذیری و عملکرد قابل اعتماد ارائه می‌دهد.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه[۱]

مواد کربنی نانوساختاری، به دلیل برخورداری از خواص الکترونیکی و مکانیکی برجسته و سطح فعال بالا، نقش مهم و غیرقابل انکاری در توسعه فناوری‌های نوین الکترونیکی و حسگری ایفا می‌کنند. در این میان، گرافن—لایه‌ای منفرد از اتم‌های کربن با آرایش شبکه‌ای شش‌ضلعی دوبعدی— توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است، چرا که مجموعه‌ای منحصربه‌فرد از خواص الکترونیکی، نوری، حرارتی و مکانیکی را ارائه می‌دهد. این ویژگی‌ها امکان

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Saeid.masoumi@iau.ac.ir
[۱] گروه برق، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

توسعه کاربردهای متنوعی از جمله ترانزیستورهای اثر میدانی Field Effect Transistor (FET)، حسگرهای فوق‌حساس، الکترودهای رسانای شفاف و نانوکامپوزیت‌های پیشرفته را فراهم می سازند. در سال‌های اخیر، ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر گرافن به دلیل فعالیت سطحی بالا و حساسیت مستقیم به تعاملات سطحی، در تشخیص سریع مولکول‌های زیستی و نوروترانسمیترها کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند[۱]. گرافن به ویژه در حسگرهای زیستی[۲]، الکترودهای شفاف و ادوات الکترونیکی به دلیل سطح تشخیص وسیع، تحرک بالای حامل‌های بار، نویز کم و سازگاری زیستی مطلوب، مزایای قابل توجهی نشان می‌دهد[۲]. با این وجود، استفاده عملی از گرافن در این کاربردها مستلزم تولید یکنواخت، با کیفیت و در مقیاس وسیع بر روی زیرلایه‌های سازگار است[۳]. تاکنون روش‌های مختلفی برای سنتز گرافن گزارش شده‌اند، از جمله رسوب شیمیایی بخار Chemical Vapor Deposition (CVD)، لایه‌برداری مکانیکی و احیای اکسید گرافن Graphene Oxide (GO). بررسی‌های جامع اخیر در مورد تکنیک‌های سنتز گرافن نیز نشان می‌دهند که انتخاب روش مناسب نقش تعیین‌کننده‌ای در خواص نهایی کاربرد دارد[۴]. هر یک از این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند؛ به‌گونه‌ای که روش CVD نیازمند تجهیزات پیچیده و پرهزینه[۴] است و لایه‌برداری مکانیکی از نظر بازده و قابلیت تکرارپذیری محدودیت دارد. در مقابل، روش شیمیایی احیای اکسید گرافن به دلیل سادگی فرآیند، هزینه پایین و امکان تولید در مقیاس وسیع، به‌عنوان یک مسیر امید بخش برای تولید گرافن مطرح شده است[۴]. با این وجود، حضور گروه‌های اکسیژنی باقی‌مانده و نقص‌های ساختاری می‌تواند خواص الکترونیکی نهایی را تحت تأثیر قرار دهد. ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر اکسید گرافن احیا شده Reduced Graphene Oxide Field Effect Transistor (rGO-FET) به دلیل سطح فعال بالا، قابلیت مدولاسیون الکتریکی مؤثر و حساسیت برجسته نسبت به تغییرات محیطی، گزینه‌ای مناسب و کارآمد برای حسگرهای شیمیایی و زیستی محسوب می‌شوند[۵]. این دستگاه‌ها، به دلیل ویژگی‌های سطحی و الکترونیکی منحصربه‌فرد، در توسعه حسگرهای فوق‌حساس و رابط‌های عصبی نوین کاربرد دارند[۵]. در این ساختارها، تغییرات الکترونیکی کانال گرافنی به طور مستقیم با پارامترهای محیطی مانند pH، گازها و مولکول‌های زیستی مرتبط است[۶] و امکان توسعه حسگرهای فوق‌حساس و بدون برچسب را فراهم می‌کند[۷]. با وجود این مزایا، بسیاری از روش‌های گزارش‌شده برای ساخت ترانزیستورهای گرافنی مبتنی بر فرآیندهای رشد مستقیم یا انتقال شیت‌های گرافن و rGO هستند که غالباً شامل مراحل چندگانه بوده، و می توانند کنترل‌پذیری کانال، تکرارپذیری و مقیاس‌پذیری فرآیند را محدود کنند. از این رو، توسعه یک رویکرد ساخت ساده، کم‌هزینه و قابل کنترل برای آرایش یکنواخت مواد گرافنی بر روی زیرلایه‌های سیلیکونی همچنان به‌عنوان یک چالش مهم مطرح است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه حسگرهای مبتنی بر گرافن و اکسید گرافن احیاشده در سال‌های اخیر[۵, ۸]، چالش‌های اساسی همچنان مانع از تجاریسازی گسترده آن‌ها شده است. بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که اکثر حسگرهای گزارش‌شده برای دستیابی به حساسیت بالا، نیازمند فرآیندهای سنتز پیچیده (مانند CVD)[۴] یا اصلاح شیمیایی سطح با گیرنده‌های زیستی خاص (مانند آپتامرها و آنتی‌بادی‌ها) و عملیات شیمیایی چندمرحله‌ای هستند[۹]. این رویکردها نه تنها هزینه‌های تولید را به شدت افزایش می‌دهند، بلکه پایداری دستگاه‌ها را در برابر شرایط محیطی متغیر کاهش داده و تکرارپذیری ساخت را محدود کرده و فرآیند تولید را در مقیاس بزرگ دشوار می‌سازد. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات بر روی تشخیص گازها یا یون‌ها تمرکز داشته‌اند و گزارش‌های محدودی در مورد تشخیص مؤثر مولکول‌های پیچیده آلی مانند مواد منفجره مانند Cyclotrimethylene trinitramine (RDX) با استفاده از ساختارهای ساده و بدون عامل‌دار کردن وجود دارد[۱۰]. در پاسخ به این چالش‌ها، پژوهش حاضر با استفاده از یک روش محلول‌محور و اسپین‌کوتینگ ساده، کانال‌های rGO با کیفیت بالا، یکنواخت و با اتصال الکتریکی پایدار بر روی زیرلایه‌های Si/SiO_2 تولید کرده است. مزیت اصلی این رویکرد در سادگی، هزینه پایین و قابلیت مقیاس‌پذیری آن است که امکان تولید rGO-FETهای قابل اعتماد را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، حسگرهای طراحی‌شده نشان‌دهنده رفتار دوقطبی قابل تکرار و حداقل هیسترزیس هستند که پایداری عملکرد و دقت اندازه‌گیری را تضمین می‌کند. این ویژگی‌ها امکان توسعه حسگرهای فوق‌حساس و بدون نیاز به گیرنده‌های

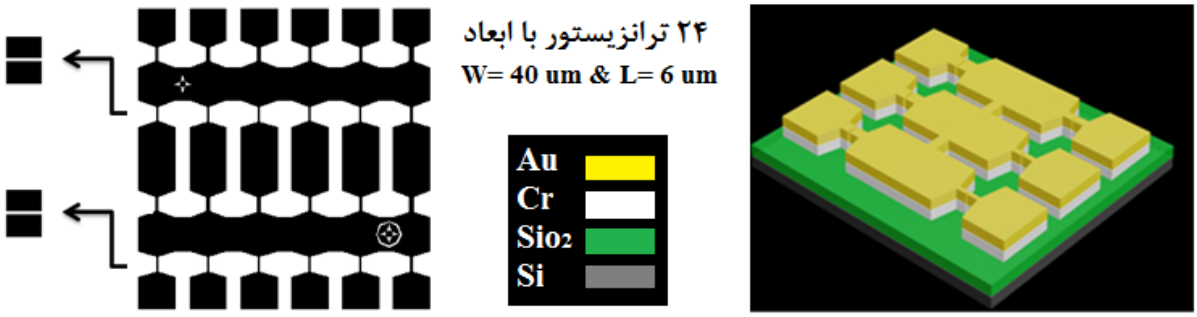
UNCORRECTED PROOF

شیمیایی پیچیده را فراهم می‌سازد و نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده می‌تواند جایگزینی عملی و مؤثر برای روش‌های سنتی ساخت rGO-FET باشد. در نهایت، این مطالعه با ارائه یک چارچوب تحلیلی–تجربی برای بررسی رفتار انتقال بار، به بهینه‌سازی عملکرد حسگری این دستگاه‌ها در برابر تغییرات pH و مولکول‌های هدف کمک می‌کند. در این رویکرد، نانوورقه‌های rGO در یک سوسپانسیون پایدار، به صورت یکنواخت از طریق اسپین‌کوتینگ در ناحیه کانال ترانزیستور رسوب داده می‌شوند. این روش امکان تشکیل کانال فعال بدون نیاز به فرآیندهای رشد یا انتقال پیچیده را فراهم کرده و شرایط مناسبی برای دستیابی به رفتار الکتریکی پایدار و پاسخ حسگری قابل اعتماد ایجاد می‌کند. در مطالعه پیشین ما، فرآیند ساخت و انتقال شیت‌های اکسید گرافن احیا شده (rGO) به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفت[۱۱]. در مقابل، پژوهش حاضر بر تحلیل عملکرد دستگاه و مدل‌سازی الکتریکی ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر rGO متمرکز است. علاوه بر این، عملکرد حسگری ترانزیستورها در مواجهه با یک مولکول هدف خاص (RDX) نیز ارزیابی شد تا قابلیت کاربردی و پاسخ واقعی دستگاه‌ها مورد سنجش قرار گیرد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-طراحی و ساخت ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر اکسید گرافن احیا شده(rGO-FET)

برای ساخت ترانزیستورهای اثر میدانی (FET) مبتنی بر اکسید گرافن احیا شده (rGO)، از طرح شماتیک نشان‌داده‌شده در شکل (۱) به عنوان نمای کلی ساختار دستگاه استفاده شد. طرح پیشنهادی شامل ۲۴ ترانزیستور با ابعاد کانال $W = 40\ \mu m$ و $L = 6\ \mu m$ است که به منظور ارزیابی یکنواختی و تکرارپذیری عملکرد الکتریکی طراحی شده‌اند. در مرحله نخست، زیرلایه‌های سیلیکونی نوع p با جهت کریستالی ⟨۱۰۰⟩ و ضخامت ۴۰۰ میکرومتر انتخاب و تحت فرآیند آماده‌سازی اولیه قرار گرفتند. تمیزکاری زیرلایه‌ها با استفاده از روش Radio Corporation of America (RCA) cleaning method اصلاح‌شده انجام شد و سپس، به منظور تشکیل لایه اکسید سیلیکونی با ضخامت حدود ۳۵۰ نانومتر، نمونه‌ها در کوره اکسیداسیون خشک در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد اکسید شدند. یکنواختی و کیفیت لایه SiO_2 نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری و عملکرد الکتریکی ترانزیستورها ایفا می‌کند[۱۱]. به منظور تسهیل فرآیند ترازیابی و اطمینان از قرارگیری مناسب شیت‌های rGO در ناحیه کانال، الکترودهای کروم با ضخامت ۳۰ نانومتر و ابعاد $w = 40\ \mu m\ \&\ L = 24\ \mu m$ بر روی زیرلایه‌های SiO_2/Si با استفاده از فناوری‌های میکرو/نانو شامل فوتولیتوگرافی و تبخیر الکترونی ساخته شدند. این الکترودها به‌عنوان مارکرهای هم‌ترازی عمل کرده و فاصله هندسی آن‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده است که بخشی از شیت‌های rGO در نواحی زیر الکترودها قرار گرفته و اتصال الکتریکی مؤثری بین الکترودهای سورس و درین برقرار گردد[۱۱].



شکل ۱- شماتیک ساختار ترانزیستور اثر میدانی مبتنی بر اکسید گرافن احیاشده با نمایش نمای برش‌خورده.

CORRECTED PROOF

برای درک بهتر مراحل ساخت حسگرrGO-FET، یک فلوچارت مراحل گام‌به‌گام از آماده‌سازی زیرلایه تا تشکیل الکترودهای نهایی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- فلوچارت گام‌به‌گام ساخت حسگرrGO-FET، از آماده‌سازی زیرلایه تا تشکیل الکترودهای سورس و درین.

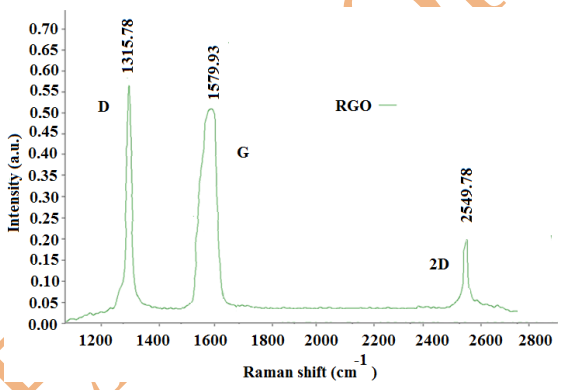
۲-۲-آماده‌سازی سطح زیرلایه و رسوب سوسپانسیون اکسید گرافن احیا شده (rGO)

برای آماده‌سازی زیرلایه‌های Si/SiO_2 به منظور انتقال شیت‌های اکسید گرافن احیا شده (rGO)، از پروتکل چهارمرحله‌ای اصلاح‌شده ارائه‌شده توسط معصومی استفاده شد[۱۱]. این پروتکل شامل تمیزکاری سطح به روش RCAاصلاح‌شده، فعال‌سازی کوتاه مدت با محلول پیرانا، عاملی‌سازی کنترل‌شده با (3-Aminopropyl) triethoxysilane (APTES) و اعمال پوشش محافظ انتخابی Poly(methyl methacrylate) (PMMA) است. اجرای این مراحل باعث افزایش آب‌دوستی سطح، بهبود چسبندگی شیت‌ها و یکنواختی پوشش نهایی می‌شود و کیفیت انتقال شیت‌ها را به‌طور قابل توجهی ارتقاء می‌دهد.

برای آماده‌سازی سوسپانسیونrGO ، ۱۰۰ میکروگرم پودر اکسید گرافن احیا شده در ۱ میلی‌لیتر حلال N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) حل شد و محلول به مدت ۲ ساعت تحت سونیکیشن قرار گرفت. سپس سوسپانسیون با سرعت ۸۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد تا شیت‌های بزرگ‌تر در ته تیوپ جمع شوند. حجم بالایی سوسپانسیون (شیت‌های کوچک) برای مرحله بعدی نگه داشته شد و حجم پایینی (شیت‌های بزرگ) دور ریخته شد. در مرحله بعد، سوسپانسیون با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول بالایی دور ریخته شد و رسوب جمع‌شده در ته تیوپ نگه داشته و به حجم ۱.۵ میلی‌لیتر رسانده شد. به این ترتیب، سوسپانسیون rGO با غلظت مورد نظر آماده شد. سطح نمونه دارای مارکرهای کروم با ضخامت ۳۰ نانومتر، با محلول پیرانا فعال شد($H_2SO_4:H_2O_2 = 3:1$)، زمان ۸ دقیقه) تا گروه‌های OH^- روی سطح اکسید ایجاد گردد. سپس نمونه با آب مقطر شسته و خشک شد. برای عاملی‌سازی، محلول ۲٪ APTES در اتانول آماده شد و نمونه به مدت ۲ ساعت تحت جریان نیتروژن خالص نگه داشته شد تا لایه Self-assembled monolayer (SAM) ایجاد شود. در پایان، نمونه با اتانول شسته و در کوره ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه خشک شد. این توالی بهینه باعث افزایش یکنواختی شیت‌های rGO و جلوگیری از تجمع نانوورقه‌ها شد. پس از آماده‌سازی سطح، سوسپانسیون rGO با حجم ۱۰–۱۵ میکرو لیتر روی زیرلایه اعمال شد و با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه اسپین‌کوتینگ شد و سپس در دمای اتاق خشک گردید تا شیت‌های rGO یکنواخت و کم‌لایه بر روی سطح تشکیل شوند. تحت شرایط اسپین‌کوتینگ و خشک‌سازی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که از تجمع یا کلوخه شدن نانوورقه‌ها جلوگیری شود. این رویکرد تضمین می‌کند که شیت‌های rGO با کیفیت بالا، تمیز و یکنواخت برای مراحل بعدی ساخت دستگاه‌های میکرو/نانو الکترونیکی آماده باشند و امکان تکرارپذیری بالا و کنترل مناسب بر ویژگی‌های الکتریکی کانال rGO فراهم گردد. کیفیت ساختاری و یکنواختی شیت‌های rGO پس از فرآیند اسپین‌کوتینگ و خشک‌سازی، با استفاده از طیف رامان

UNCORRECT

بررسی شد. نتایج نشان داد که ساختار کریستالی rGO حفظ شده و نقص‌های ساختاری عمده‌ای ایجاد نشده است[۱۱]. طیف رامان rGO رسوب داده شده روی زیرلایه $Si/SiO_2/Cr$ در شکل ۳ نشان داده شده و حضور قله‌های D و G نشان‌دهنده حفظ ساختار شبکه کربنی و کم بودن نقص‌های ساختاری است. ویژگی‌های باند 2D، شامل پهنای محدود و شدت قابل مقایسه با باند G، بیانگر این است که شیت‌های rGO در ناحیه کانال دارای تعداد لایه کم و ضخامت یکنواخت هستند[۱۱].



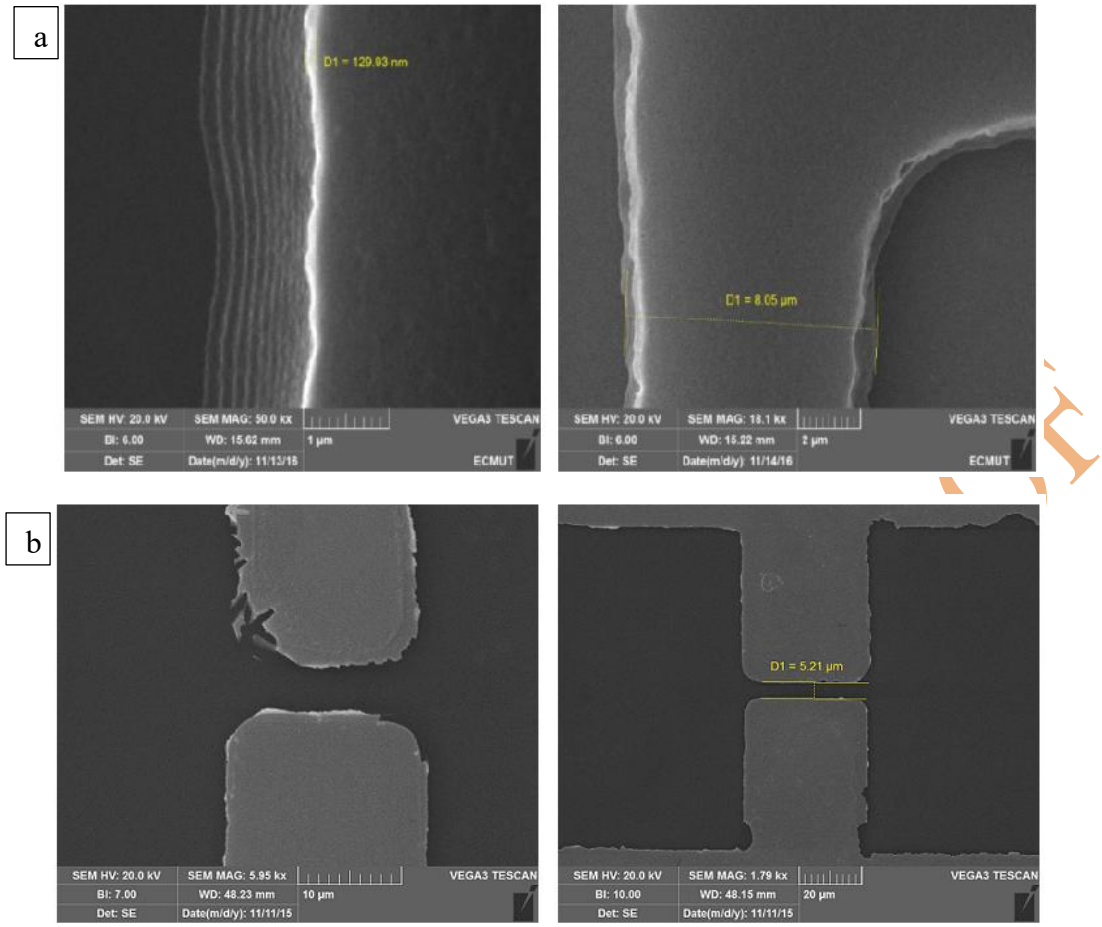
شکل ۳- طیف رامان rGO بر روی زیرلایه $Si/SiO_2/Cr$.حضور قله‌های D و G نشان‌دهنده حفظ ساختار کریستالی و کیفیت بالای شیت‌های rGO است.

نسبت I_D/I_G کم، کیفیت بالای شیت‌های rGO و یکنواختی کانال ترانزیستورها را تأیید می‌کند. جزئیات کامل فرآیند آماده‌سازی سوسپانسیون، پارامترهای اسپین‌کوتینگ و شرایط انتقال در مرجع ارائه شده است[۱۱]. به منظور ارزیابی یکنواختی فرآیند و پراکندگی صفحات rGO ، چندین نمونه سوسپانسیون بر روی زیرلایه‌های مشابه اعمال شد. طیف های رامان نشان دادند که شیت‌ها به صورت یکنواخت و کم‌لایه روی سطح قرار گرفته‌اند و تجمع یا کلوخه شدن قابل توجه مشاهده نشد، که بیانگر تکرارپذیری مناسب روش اسپین‌کوتینگ و کنترل دقیق پارامترهای فرآیند است.

۲-۳-الگوگیری شیت های rGO و ساخت الکترودهای سورس-درین

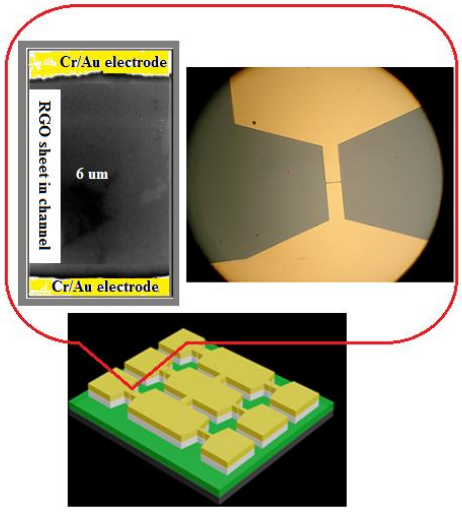
پس از اعمال سوسپانسیون و تشکیل شیت‌های rGO و الگودهی در ابعاد $L = 24\ \mu m$ و $W = 40\ \mu m$ بر روی زیرلایه‌های $Si/SiO_2/Cr$، به منظور ایجاد الکترودهای سورس و درین، ۱۲۰ نانومتر طلا بر روی ۳۰ نانومتر کروم با ابعاد کانال $W = 40\ \mu m$ و $L = 6\ \mu m$ با استفاده از فرآیند فوتولیتوگرافی استاندارد و رزین Shipley 1813 رسوب داده شد. در فرآیند لیتوگرافی معمولی، دیواره‌های جانبی فوتورزیست دارای شیب ملایم بوده و این موضوع می‌تواند در فرآیند lift-off ، به‌ویژه در ایجاد گپ‌های باریک ۶ میکرونی، منجر به جدایش ناقص فلز و باقی‌ماندن اتصالات ناخواسته شود. برای رفع این مشکل و ایجاد پروفایل جانبی مناسب با لبه‌های عمودی یا دارای برآمدگی (undercut)، جهت جداسازی راحت فلز، فرآیند لیتوگرافی با یک مرحله بهینه‌سازی اصلاح شد. پس از تابش UV و پیش از مرحله توسعه فتورزیست، نمونه‌ها به مدت ۱ دقیقه در محلول تولوئن غوطه‌ور شده و پس از آن شستشو داده نشدند. این مرحله باعث سخت‌شدن لایه‌های بالایی فوتورزیست و شکل‌گیری پروفایل لبه‌ای مناسب برای جدایش کامل فلز و فرآیند lift-off می‌شود. همان‌طور که در تصویر Scanning Electron Microscopy (SEM) شکل ۴ (a) مشاهده می‌شود، اعمال مرحله خیساندن در تولوئن منجر به بهبود قابل توجه پروفایل لبه‌های فوتورزیست شده است. تأثیر مستقیم این بهینه‌سازی بر کیفیت فرآیند lift-off در تصویر SEM شکل ۴ (b) نشان داده شده است، در نمونه بدون استفاده از تولوئن، پروفایل نامناسب فوتورزیست منجر به نقص در lift-off و جدایش ناقص فلز و ایجاد گپ های نامناسب می شود، در حالی که در نمونه بهینه شده با مرحله تولوئن، فلز به‌طور کامل جدا شده و الکترودهای سورس و درین با تعریف هندسی دقیق تشکیل شده‌اند. با توجه به تغییر خواص فوتورزیست ناشی از جذب تولوئن، زمان نوردهی و توسعه فوتورزیست متناسب با این تغییرات تنظیم شد. در نهایت، پس از پایان توسعه، فلز اضافی با lift-off در دمای ۸۰°C با استفاده از محلول Remover 1165 حذف شد و نمونه‌ها با ایزوپروپیل الکل به طور کامل شستشو داده شدند.

UNCORRECTED PROOF



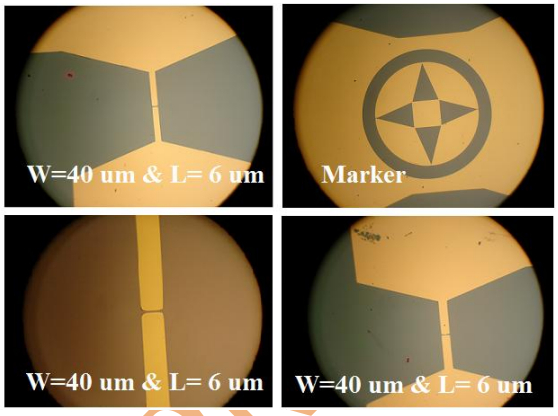
شکل ۴- تصاویر SEM از پروفایل فوتورزیست و نتیجه فرآیند lift-off. (a) پروفایل لبه‌های فوتورزیست پس از اعمال مرحله خیساندن در تولوئن که منجر به ایجاد پروفایل جانبی مناسب (undercut) برای فرآیند lift-off می‌شود. (b) مقایسه نتیجه فرآیند lift-off در نمونه بدون استفاده از تولوئن (جدایش ناقص فلز و و ایجاد گپ‌های ۶ میکرونی نامناسب) و نمونه بهینه‌شده با مرحله تولوئن (جدایش کامل فلز و تشکیل دقیق الکترودهای سورس و درین)

تصویر SEM کانال rGO پس از فرآیند lift-off در شکل ۵ نشان داده شده است. شیت‌های rGO در ناحیه کانال یکنواخت و کم‌لایه هستند و الکترودهای سورس و درین با هندسه نهایی به طور دقیق تشکیل شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که کانال‌های rGO از لحاظ کیفیت و یکنواختی مناسب بوده و اتصال مؤثر بین الکترودها برقرار شده و دستگاه rGO-FET با موفقیت ساخته شده است. کل دستگاه دارای ابعاد $1.45 \times 1.45\ cm^2$ است و برای افزایش چسبندگی طلا به زیرلایه، یک لایه کروم به ضخامت ۳۰ نانومتر اعمال شد. تصاویر میکروسکوب نوری از سنسور rGO-FET با الکترودهای Cr-Au در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵– تصویر SEM کانال rGO پس از فرآیند Lift-off.

پس از آماده‌سازی کامل کانال و الکترودها، مشخصه‌های الکتریکی دستگاه‌های نهایی با استفاده از آنالایزر پارامتر نیمه‌هادی Agilent 4145B اندازه‌گیری شد تا رفتار انتقالی و خروجی ترانزیستورها به‌طور دقیق ارزیابی شود.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ نوری سنسور RGO-FET ساخته شده با الکترودهای Cr/Au.

به منظور ارزیابی تکرارپذیری و یکنواختی فرآیند ساخت پیشنهادی، مجموعه ۲۴ ترانزیستور rGO-FET با ابعاد یکسان (W= 40 µm & L= 6 µm) روی یک زیرلایه Si/SiO_2 مشابه ساخته شدند. نتایج مشخصه‌یابی الکتریکی اولیه نشان داد که بیش از ۹۰٪ دستگاه‌ها دارای رفتار دوقطبی قابل قبول و تماس‌های اهمی مناسب هستند. انحراف معیار جریان درین در ولتاژ گیت مشخص بین دستگاه‌های مختلف کمتر از ۵٪ اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده کنترل دقیق پارامترهای فرآیند (مانند غلظت سوسپانسیون و سرعت اسپین) و تکرارپذیری بالای روش ساخت می‌باشد.

۳-مشخصه‌یابی الکتریکی (rGO-FET)

۳-۱-ویژگی دوقطبی (Bipolar property) ترانزیستورهای rGO-FET

۳-۱-۱-مشاهده رفتار دوقطبی:

ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر اکسید گرافن احیا شده (rGO-FETs) رفتار دوقطبی (ambipolar) مشخصی از خود نشان دادند که در منحنی انتقالی I_DS–V_G قابل مشاهده است (شکل ۷). با تغییر ولتاژ گیت از مقادیر منفی به مثبت، جریان درین ابتدا کاهش یافته و در نقطه خنثی بار یا نقطه دیراک(Charge Neutrality Point (CNP به حداقل مقدار خود می‌رسد و سپس مجدداً افزایش می‌یابد، که بیانگر گذار حامل‌های غالب از حفره‌ها به الکترون‌ها است. قرارگیری نقطه دیراک در بازه ولتاژ گیت ۰.۵–۱ ولت و جریان‌های درین تقریباً متقارن در دو ناحیه nوp ، پایداری عملکرد و یکنواختی دستگاه‌ها را تأیید می‌کند. هیسترزیس مشاهده‌شده کمتر از ۳٪ است و نشان‌دهنده کیفیت بالای کانال rGO می‌باشد.

۳-۱-۲-تحلیل فیزیکی رفتار دوقطبی:

کانال‌های rGO به دلیل وجود گروه‌های اکسیژنی باقی‌مانده، تماس فلزی با الکترودهای Cr/Au و جذب مولکول‌های دهنده یا پذیرنده الکترون از محیط، دو نوع حامل بار غالب را نشان می دهند: حفره‌ها در ناحیه نوع p و الکترون‌ها در ناحیه نوع n. با افزایش ولتاژ گیت و عبور از نقطه دیراک، نوع حامل غالب به الکترون تغییر کرده و دستگاه وارد ناحیه نوع n می‌شود. این گذار نرم و پیوسته، نشان‌دهنده مدولاسیون مؤثر جریان کانال [۱۲] توسط میدان الکتریکی اعمال‌شده است و پایه‌ای برای رفتار دوقطبی در rGO-FET فراهم می‌کند.

۳-۱-۳-آنالیز کمی منحنی انتقالی:

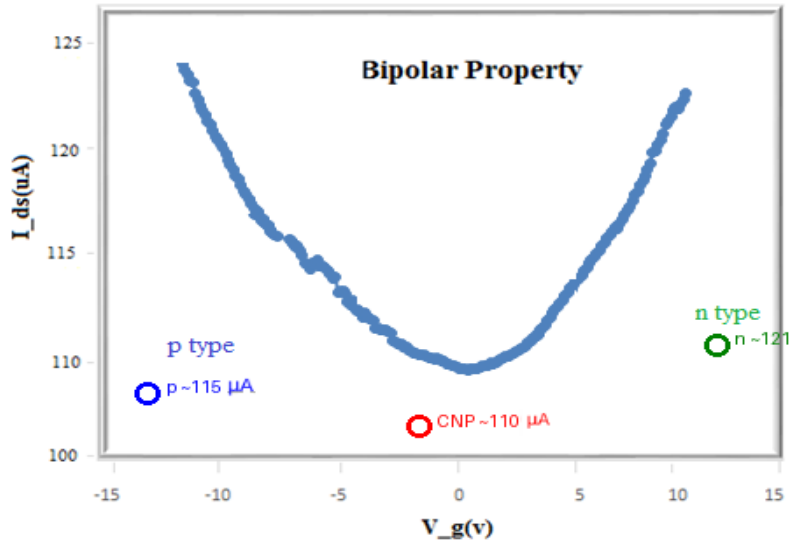
شیب منحنی انتقالی I_DS–V_G در نزدیکی نقطه دیراک بیانگر تحرک بالای حامل‌ها و کیفیت بالای کانال rGO است[۱۳]. حداقل رسانندگی مشاهده شده متناظر با نقطه دیراک بوده و جریان درین حداقل ۱۱۰ µA است. جریان درین در ناحیه نوع p در ولتاژ گیت منفی (V_G ≈ -10 V) حدود ۱۱۵ µA و در ناحیه نوع n در ولتاژ گیت مثبت (V_G ≈ +10 V) حدود ۱۲۱ µA اندازه‌گیری شد، که بیانگر تقریباً تقارن جریان درین و کنترل مؤثر چگالی حامل‌ها است. منحنی‌های اندازه‌گیری‌شده دارای هیسترزیس بسیار کم هستند که وجود حداقل تله‌های بار و آلودگی سطحی را نشان می دهد و پایداری عملکرد الکتریکی دستگاه‌ها را تضمین می‌کند. تمامی دستگاه‌های rGO-FET رفتار دوقطبی مشابهی از خود نشان دادند و تغییرات جزئی در موقعیت نقطه دیراک مشاهده شد، که با

UNCORRECTED PROOF

نتایج پیشین [14]مطابقت دارد و یکنواختی فرآیند ساخت و کیفیت بالای کانال‌های rGO را تأیید می‌کند.

۳-۱-۴-اهمیت ویژگی دوقطبی برای حسگری:

رفتار دوقطبی کانال‌های rGO همراه با پایداری جریان، rGO-FETها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای حسگری شیمیایی و زیستی فوق‌حساس تبدیل می‌کند[۱۵]. تغییرات محیطی مانند pH، حضور گازها یا مولکول‌های زیستی می‌توانند به‌طور مستقیم بر چگالی حامل‌ها و جریان کانال تأثیر گذاشته و حساسیت بالا و پاسخ سریع را برای تشخیص فراهم کنند. علاوه بر این، این ویژگی امکان توسعه حسگرهای بدون برچسب، تکرارپذیر و با قابلیت علکرد پایدار را نیز فراهم می‌سازد.



شکل ۷– منحنی انتقال I_DS–V_G ترانزیستور RGO-FET با نشان دادن نقطه دیراک (CNP ، قرمز، ۱۱۰ µA) و جریان‌های درین در نواحی نوع p (آبی، ۱۱۵ µA) و n (سبز، ۱۲۱ µA). یکنواختی و حداقل هیسترزیس، کیفیت بالای کانال و پایداری عملکرد دستگاه را نشان می‌دهد.

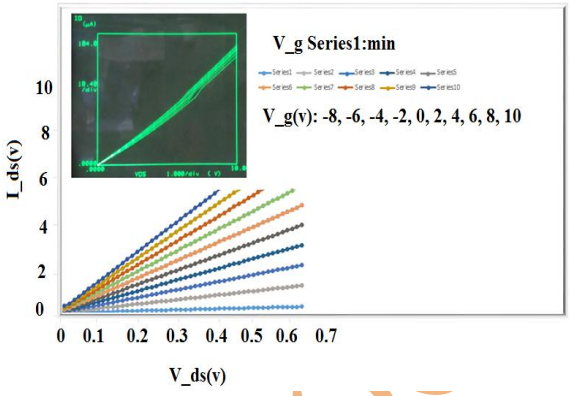
۳-۲-مشخصه‌های خروجی ترانزیستورهای rGO-FET

منحنی‌های خروجی ترانزیستورهای rGO-FET با اندازه‌گیری جریان درین (I_DS) برحسب ولتاژ درین–سورس (V_DS) در بازه ۰ تا ۰.۷ ولت و برای مقادیر مختلف ولتاژ گیت (V_G) ثبت شدند (شکل ۸). انتخاب این بازه ولتاژ پایین برای V_DS به منظور بررسی رفتار اهمی تماس‌های الکتریکی و جلوگیری از اثرات گرمایش موضعی در کانال انجام شد. برای تمامی مقادیر VG، جریان درین با افزایش VDSبه‌صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد، که بیانگر رفتار اهمی تماس‌های سورس و درین با کانال rGO و تشکیل اتصال الکتریکی مناسب بین الکترودهای Cr/Au و شیت‌های rGO و هدایت یکنواخت کانال است.

عدم مشاهده ناحیه اشباع جریان با ماهیت بدون گپ نواری rGO سازگار بوده و نشان می‌دهد که کانال تحت میدان الکتریکی به‌صورت پیوسته هدایت می‌شود. افزایش شیب منحنی‌ها با افزایش ولتاژ گیت، نشان‌دهنده کنترل مؤثر رسانندگی کانال توسط میدان گیت و تغییر موثر چگالی حامل‌هاست. تحرک حامل‌ها و حساسیت جریان کانال به ولتاژ گیت در ترانزیستورهای rGO-FET نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که دستگاه‌ها تحرک میدان‌اثر مناسبی و رسانایی انتقالی بالایی در نزدیکی نقطه دیراک دارند، که منجر به حساسیت بالا و پاسخ سریع جریان کانال به تغییرات ولتاژ گیت می‌شود. این رفتار با ماهیت دوبعدی rGO و تغییر مؤثر چگالی حامل‌ها تحت میدان گیت

UNCORRECTED PROOF

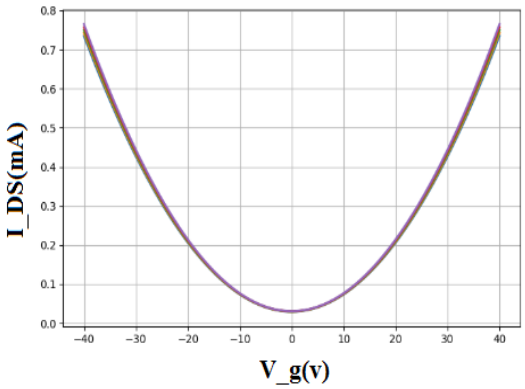
سازگار بوده و نقش کلیدی در بهبود پاسخ حسگری دستگاه ها ایفا می کند.



شکل ۸– مشخصه‌های خروجی I_DS–V_DS ترانزیستور rGO-FET در بازه ولتاژ ۰ تا ۰.۷ ولت برای ولتاژهای مختلف گیت. خطی بودن منحنی‌ها نشان‌دهنده تماس اهمی مناسب و کیفیت بالای ساخت دستگاه است.

۳-۲-۱-پایداری الکتریکی و رفتار تماس‌ها

برای ارزیابی پایداری، منحنی‌های انتقالی دستگاه‌ها در چندین سیکل اندازه‌گیری متوالی ثبت شدند (شکل ۹). نتایج نشان داد که تمامی دستگاه‌ها رفتار جریان–ولتاژ پایدار از خود نشان می‌دهند و تغییرات جریان درین بین سیکل‌های متوالی کمتر از ۲٪ است. همچنین، منحنی‌های I_DS–V_G دارای هیسترزیس بسیار کمی هستند. بررسی اثر زمان و ولتاژ اعمال‌شده نیز نشان داد که جریان درین در طول زمان تغییری نمی‌کند که نشان‌دهنده ثبات عملکرد دستگاه است.



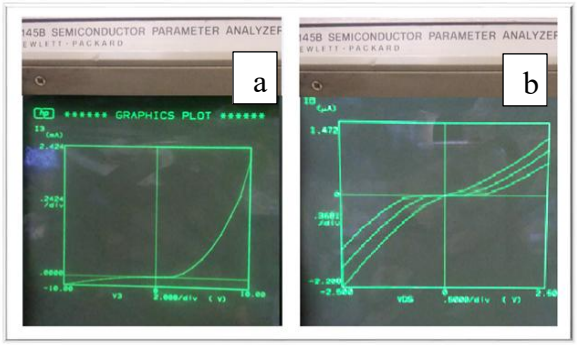
شکل ۹– منحنی‌های انتقالی I_DS –V_G ترانزیستور rGO-FET در پنج سیکل متوالی. هم‌پوشانی نزدیک منحنی‌ها و اختلاف کمتر از ۲٪ در جریان درین، پایداری الکتریکی بالا، هیسترزیس ناچیز و تکرارپذیری مناسب دستگاه را نشان می‌دهد و بر کیفیت بالای تماس‌های Cr/Au–rGO و فرآیند ساخت تأکید دارد.

۳-۲-۲-جریان نشت گیت و رفتار جریان درین در ولتاژ گسترده

بررسی جریان نشت گیت (Gate Leakage Current) نشان می‌دهد که این پارامتر در تمامی اندازه‌گیری‌ها و در محدوده ولتاژی مورد آزمایش، در مقیاس نانوآمپر (nA) باقی مانده است (شکل ۱۰a). پایداری جریان نشت در مقادیر بسیار پایین، بیانگر کیفیت مناسب لایه عایق گیت و جدایی مؤثر الکترود گیت از کانال است. از آنجا که این جریان در مقایسه با جریان درین اصلی ناچیز است، می‌توان نتیجه گرفت که نشت گیت تأثیر مخربی بر راندمان، پایداری و عملکرد کلی ترانزیستور rGO-FET نداشته و سیگنال اعمال‌شده به گیت به طور کامل صرف مدولاسیون رسانندگی کانال شده است. در ادامه، رفتار خروجی ترانزیستور در بازه ولتاژی وسیع‌تری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۰b منحنی‌های جریان درین بر حسب ولتاژ درین–سورس (I_DS-V_DS) را در بازه ±۲.۵ ولت برای ولتاژهای گیت مختلف به نمایش می‌گذارد. مشاهده می‌شود که جریان درین با افزایش ولتاژ درین–سورس، تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. این رفتار خطی در ولتاژهای نسبتاً بالا، ویژگی شناخته شده‌ای برای ترانزیستورهای مبتنی بر اکسید گرافن کاهش یافته است و نشان‌دهنده آن می باشد که مکانیزم‌های انتقال بار در کانال مانع از اشباع زودرس جریان شده و دستگاه در این بازه ولتاژی نیز رفتاری قابل پیش‌بینی و پایدار از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، افزایش شیب منحنی‌ها با تغییر ولتاژ گیت، کاملاً با ویژگی‌های انتقالی کانال مطابقت دارد؛ به طوری که با اعمال ولتاژ گیت بیشتر، تراکم حامل‌های بار در کانال افزایش یافته و در نتیجه، رسانندگی کانال به طور مؤثرتری کنترل می‌شود. شایان ذکر است که شکل ۸ رفتار خروجی را در بازه ولتاژ پایین (۰ تا ۰.۷ ولت) برای تأیید تماس اهمی بررسی کرده است، در حالی که شکل ۱۰b پایداری و

UNCORRECTED PROOF

خطیت جریان را در بازه ولتاژی وسیع‌تر (±۲.۵ ولت) نشان می‌دهد. شکل b۱۰ نشان می‌دهد که ترانزیستور قادر است کنترل‌پذیری و خطیت خود را در طیف وسیع‌تری از ولتاژهای عملیاتی حفظ کند، که این امر برای کاربردهای عملی دستگاه حائز اهمیت است.

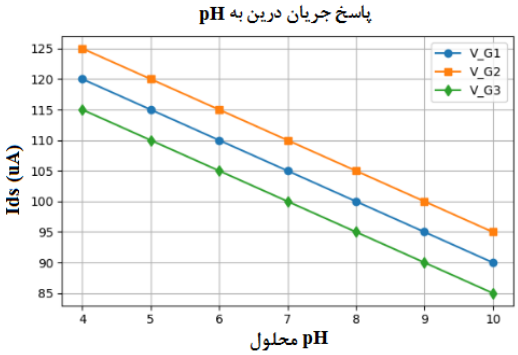


شکل ۱۰- a) جریان نشت گیت (gate leakage) ترانزیستور rGO-FET در تمامی اندازه‌گیری‌ها، نشان‌دهنده مقادیر بسیار پایین در محدوده nA و تأثیر ناچیز آن بر عملکرد دستگاه. b) منحنی جریان درین I_DS بر حسب ولتاژ منبع–درین V_DSبرای ولتاژهای گیت مختلف، نشان‌دهنده افزایش تقریباً خطی جریان و کنترل مؤثر رسانندگی کانال توسط ولتاژ گیت.

۳-۳-عملکرد حسگری ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر rGO (rGO-FET Sensing Performance)

۳-۳-۱-پاسخ به تغییرات pH

عملکرد حسگری ترانزیستورهای rGO-FET در پاسخ به تغییرات محیطی، به‌ویژه تغییرات pH محلول‌های آبی[۱۶]، مورد بررسی قرار گرفت. هدف این تحلیل، ارزیابی حساسیت، پاسخ‌دهی و تکرارپذیری دستگاه‌ها برای کاربردهای شیمیایی و زیستی است. برای اندازه‌گیری پاسخ حسگری، دستگاه‌ها در تماس با محلول‌های با pH مختلف قرار گرفتند و جریان درین در ولتاژ گیت ثابت ثبت شد. تغییرات جریان (ΔI_DS/I_DS0) نسبت به pH به عنوان شاخص حساسیت سنجیده شد. نتایج شماتیک پاسخ جریان درین ترانزیستور rGO-FET به محلول‌های مختلف pH در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تمامی اندازه‌گیری‌ها در دمای محیط و شرایط کنترل‌شده انجام گرفت تا اثرات محیطی ناخواسته به حداقل برسند. تغییر pH منجر به تغییرات قابل توجهی در جریان درین می‌شود. این تغییرات ناشی از برهم‌کنش یون‌های H^+ و OH^- با گروه‌های عاملی سطح rGO و مدولاسیون چگالی حامل‌هاست. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که حداکثر حساسیت در محیط نزدیک به خنثی (pH = 7) مشاهده می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که علاوه بر حساسیت بالا، زمان پاسخ دستگاه به تغییرات pH بسیار سریع و حدود ۵ ثانیه است.

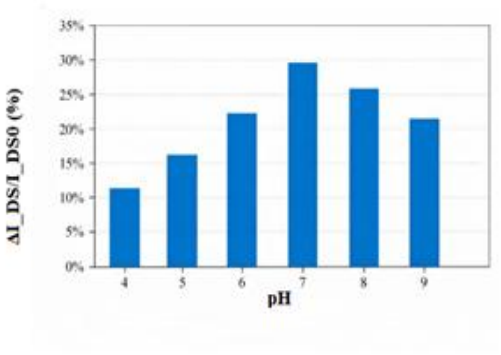


شکل ۱۱– پاسخ جریان درین I_DS ترانزیستور rGO-FET به محلول‌های با pH مختلف. تغییرات قابل توجه جریان با تغییرpH ، حساسیت بالای دستگاه و پاسخ سریع آن را نشان می‌دهد.

۳-۳-۲-تکرارپذیری پاسخ

تکرارپذیری پاسخ ترانزیستورهای rGO-FET با اندازه‌گیری حساسیت نسبی ΔI_DS/I_DS0 در چند سیکل بررسی شد تا پایداری و قابلیت اعتماد دستگاه‌ها ارزیابی گردد (شکل ۱۲). نتایج نشان دادند که تغییرات جریان بین سیکل‌های مختلف کمتر از ۳٪ است، که حاکی از پایداری بالا و عملکرد قابل اعتماد دستگاه می‌باشد. این رفتار، به ویژه در کاربردهای حسگری شیمیایی و زیستی اهمیت دارد، زیرا حتی تغییرات کوچک محیطی می‌توانند به‌طور مستقیم بر جریان کانال تأثیر بگذارند و نیاز به حسگری تکرارپذیر و بدون خطا را برآورده می‌کنند. علاوه بر این، بررسی شکل ۱۲ نشان می‌دهد که حداکثر حساسیت در pH = 7 (محیط خنثی) رخ می‌دهد که نشان‌دهنده پاسخ بهینه کانال rGO در این ناحیه است.

UNCORRECTED PR



شکل ۱۲– حساسیت نسبی ΔI_DS/I_DS0 ترانزیستور rGO-FET در برابر تغییرات pH محلول‌های آبی. ΔI_DS/I_DS0 تغییر نسبی جریان درین نسبت به جریان پایه I_DS0 در pH مرجع را نشان می‌دهد. حداکثر حساسیت در pH = 7 مشاهده شده است، که نشان‌دهنده پاسخ بهینه کانال rGO در محیط نزدیک به خنثی است.

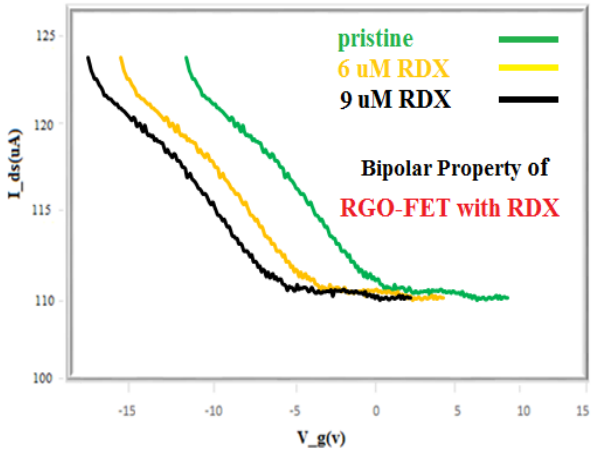
۳-۳-۳-پاسخ rGO-FET به ماده منفجره RDX

ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر rGO بدون عاملدارکردن (بدون گیرنده پپتیدی) در مواجهه با مولکول هدف RDX پاسخ حسگری مشخصی از خود نشان دادند. علاوه بر شناسایی مواد منفجره مانند RDX، ترانزیستورهای rGO-FET به دلیل سطح فعال بالا و رفتار دوقطبی پایدار، توانایی شناسایی طیف گسترده‌ای از آنالیت‌های شیمیایی و زیستی از جمله یون‌ها، گازها و پروتئین‌ها را نیز نشان داده‌اند[۱۵]. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، منحنی‌های انتقال I_DS –V_G در غیاب RDX و در حضور دو غلظت مختلف از RDX، (۶ و ۹ µM) اندازه‌گیری شده‌اند. در تمامی حالات رفتار دوقطبی دستگاه حفظ شده است، اما با افزایش غلظت RDX، نقطه دیراک به صورت سیستماتیک به سمت ولتاژهای گیت پایین تر (left shift) جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی تدریجی نشان‌دهنده پاسخ حسگری وابسته به غلظت و برهم‌کنش مؤثر مولکول‌های RDX با کانال rGO است. از آنجا که rGO در حالت bare دارای نقص‌های ساختاری و گروه‌های عاملی اکسیژنی متعددی است، جذب مولکول‌های RDX می‌تواند منجر به تغییرات موضعی در توزیع بار شود که در نمودار به صورت شیفت نقطه دیراک تظاهر می‌یابد. تغییرات قابل توجه در جریان درین با افزایش غلظت RDX نیز تأییدکننده پاسخ وابسته به غلظت و تکرارپذیر دستگاه است. علاوه بر حساسیت مناسب، زمان پاسخ اندازه‌گیری شده برای این حسگر بسیار کوتاه بود و حدود ۸ ثانیه به دست آمد که نشان‌دهنده سرعت بالای تبادل بار و پتانسیل این دستگاه برای کاربردهای بلادرنگ است.

برای تحلیل کمی پاسخ حسگری، تغییر نقطه دیراک ΔV Dirac به عنوان تابعی از غلظت RDX تعریف شد:

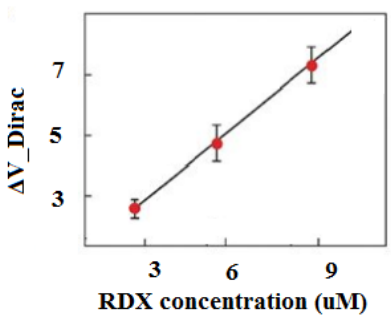
$$\Delta V\ Dirac = V\ Dirac,C - V\ Dirac,0 \quad (1)$$

که در آن V Dirac,C نقطه دیراک در حضور غلظت C از RDX و VDirac,0 موقعیت نقطه دیراک در شرایط پایه (غیاب RDX) است. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده، تغییرات نقطه دیراک با افزایش غلظت RDX رفتار تقریباً خطی از خود نشان می‌دهد که بیانگر حساسیت مناسب دستگاه است. افزایش غلظت RDX موجب پاسخ قابل توجه کانال rGO و تکرارپذیری بالای آن شد (شکل ۱۴). حفظ رفتار دوقطبی همراه با شیفت منظم نقطه دیراک، پایداری الکتریکی و قابلیت اعتماد دستگاه را در فرآیند حسگری تأیید می‌کند.



شکل ۱۳– شیفت تدریجی نقطه دیراک با افزایش غلظت RDX، تأیید پاسخ حسگری وابسته به غلظت.

CORRECTED PROOF



شکل ۱۴–نمودار ΔVDirac در مقابل غلظت rDX، نشان‌دهنده پاسخ خطی حسگری و تکرارپذیری بالای اندازه‌گیری.

ویژگی‌های کلیدی ترانزیستورهای rGO-FET ساخته‌شده، شامل هندسه کانال، جریان درین، هیسترزیس، حساسیت و شیفت نقطه دیراک در مواجهه با RDX، در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

۳-۴-تحلیل خطا و عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها

به منظور ارزیابی اعتبار و دقت نتایج حاصل از حسگرهای rGO-FET، تحلیل خطا و محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها انجام پذیرفت. منابع اصلی خطا در این مطالعه شامل خطای سیستماتیک ناشی از تجهیزات اندازه‌گیری، نویز الکترونیکی محیطی و پراکندگی آماری بین دستگاه‌های مختلف بود. عدم قطعیت در اندازه‌گیری جریان درین (I_DS) و ولتاژ گیت (V_G) بر اساس دقت دستگاه اندازه‌گیری و انحراف معیار داده‌های تجربی در چند سیکل تکراری محاسبه شد.

جدول ۱- خلاصه مشخصه‌های هندسی، الکتریکی و حسگری ترانزیستورهای rGO-FET ساخته‌شده. مقادیر جریان درین در نواحی نوع p و n، موقعیت نقطه دیراک، میزان هیسترزیس و حساسیت نسبی جریان درین در شرایط محیطی مختلف ارائه شده‌اند.

ویژگی کلیدی	مقدار/توضیحات
هندسه	$W = 40\ \mu m$, $L = 6\ \mu m$، ضخامت شیت RGO، کم‌لایه و یکنواخت
نقطه دیراک	$V_{Dirac} = 0.5 – 1\ V$
جریان درین	$I_{DS,p} = 115\ \mu A$ ($V_G \approx -10\ V$) $I_{DS,n} = 121\ \mu A$ ($V_G \approx +10\ V$)
هیسترزیس	< 3%
حساسیت	$\Delta I_{DS}/I_{DS0} \approx 25–30\%$ (pH 7)
شیفت نقطه دیراک برای RDX (6–9 µM)	جابه‌جایی به سمت ولتاژ گیت پایین‌تر (left shift)
تکرارپذیری	تغییر جریان بین سیکل‌ها < ۳%

نتایج نشان داد که انحراف معیار نسبی (RSD) جریان درین در ناحیه پایدار کمتر از ۳٪ است که با هیسترزیس کم مشاهده‌شده در منحنی‌های انتقالی (کمتر از۳٪) همخوانی دارد. برای پارامتر حساس موقعیت نقطه دیراک، عدم قطعیت اندازه‌گیری با در نظر گرفتن شیب منحنی انتقال در نزدیکی نقطه دیراک و رزولوشن ولتاژ گیت (در حد میلی‌ولت) برآورد شد. در آزمایش‌های حسگری، خطای ناشی از تغییرات غلظت محلول و نوسانات دمای محیط نیز در تحلیل عدم قطعیت لحاظ گردید. با توجه به تکرارپذیری بالای پاسخ حسگر (تغییرات کمتر از ۳٪ در سیکل‌های متوالی) و رفتار خطی مناسب در منحنی‌های کالیبراسیون ($R^2 > 0.95$)، می‌توان نتیجه گرفت که عدم قطعیت کل اندازه‌گیری‌ها در محدوده قابل قبول برای کاربردهای حسگری قرار دارد و داده‌های گزارش‌شده از اعتبار آماری کافی برخوردارند. از این رو، خطاهای

UNCORRECTED PROOF

اندازه‌گیری تأثیر معناداری بر روند کلی نتایج و تفسیر عملکرد حسگر ندارند.

۴-بحث و تحلیل

۴-۱-منشأ رفتار دوقطبی و شیفت نقطه دیراک در ترانزیستورهای rGO-FET

رفتار دوقطبی درrGO-FETها ناشی از ماهیت نیمه‌رسانای دو بعدی کانال rGO با گاف نواری مؤثر نزدیک صفر است، که اجازه هدایت توسط هر دو نوع حامل بار (حفره و الکترون) را فراهم می‌کند. ولتاژ گیت اعمال‌شده، سطح فرمی کانال را جابه‌جا می‌کند و نوع حامل غالب در کانال تغییر می‌یابد. رفتار دوقطبی در این دستگاه‌ها به تغییر چگالی حامل‌ها در اطراف نقطه دیراک باز می‌گردد[۱۷]. حضور گروه‌های اکسیژنی باقی‌مانده و نقص‌های ساختاری درrGO ، همراه با تماس فلزی Cr/Au، منجر به ایجاد حالت‌های تله سطحی و دوپینگ ذاتی خفیف شده و موقعیت نقطه دیراک را تعیین می‌کند. شیفت نقطه دیراک در مواجهه با عوامل محیطی مختلف، مانند تغییرات pH یا حضور مولکول‌های هدف مانندRDX، نشان‌دهنده تغییر چگالی حامل‌ها و جابه‌جایی سطح فرمی کانال است. این پدیده پایه اصلی پاسخ حسگری rGO-FETها را تشکیل می‌دهد و توضیح می‌دهد که چرا این دستگاه‌ها حساسیت بالا و پاسخ سریع نسبت به تغییرات شیمیایی و زیستی دارند.

۴-۲-مکانیزم انتقال بار و پاسخ حسگری مبتنی بر تغییرات pH

پاسخ حسگری ترانزیستورهای rGO-FET به تغییرات pH محیط آبی، مستقیماً از برهم‌کنش یون‌های H^+ و OH^- با سطح فعال کانالrGO ناشی می شود. سطح rGO به دلیل وجود گروه‌های عاملی اکسیژنی باقیمانده و نقص‌های ساختاری، دارای تعداد زیادی سایت فعال سطحی است که امکان جذب و تبادل بار با گونه‌های یونی محیط را فراهم می‌کنند. این برهم‌کنش‌های سطحی منجر به تغییر چگالی حامل‌ها در کانال و در نتیجه مدولاسیون جریان درین می‌شوند. در محیط‌های اسیدی (pH پایین)، افزایش غلظت یون‌های H^+ منجر به افزایش چگالی حفره‌ها در کانال شده و در نتیجه جریان درین افزایش می‌یابد. در مقابل، در محیط‌های بازی (pH بالا)، جذب یون‌های OH^- یا کاهش نسبی یون‌های H^+ باعث افزایش سهم الکترون‌ها به‌عنوان حامل غالب شده و رفتار نوع n کانال را تقویت می کند. این فرآیندها به‌صورت تغییرات قابل توجه جریان درین در ولتاژ گیت ثابت و همچنین جابه‌جایی نسبی منحنی‌های انتقالی قابل مشاهده هستند. حساسیت بالای تغییرات نسبی جریان $\Delta I_DS/I_DS0$ نسبت به pH، همراه با تکرارپذیری مناسب پاسخ در سیکل‌های اندازه‌گیری مختلف، نشان‌دهنده پایداری شیمیایی سطح RGO و اتصال الکتریکی پایدار کانال در شرایط آبی است. مشاهده بیشینه حساسیت در pH نزدیک به خنثی را می‌توان به بیشینه بودن برهم‌کنش مؤثر سطح rGO با گونه‌های یونی در شرایط تعادل یونی نسبت داد؛ ویژگی‌ای که این ساختار را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای زیستی و محیط‌های فیزیولوژیکی تبدیل می‌کند.

۴-۳-تحلیل مکانیزم حسگری rGO-FET به مولکول RDX و تحلیل شیفت نقطه دیراک

پاسخ حسگری مشاهده‌شده در ترانزیستورهای rGO-FET نسبت به مولکول RDX، حتی در غیاب هرگونه عامل‌دارکردن هدفمند (بدون گیرنده پپتیدی)، بیانگر پتانسیل ذاتی بالای کانال rGO برای تشخیص مواد منفجره است. برای درک چرایی این پدیده، باید به مکانیزم‌های فیزیکی حاکم بر برهم‌کنش سطحی-مولکولی پرداخت. از دیدگاه فیزیکی، مکانیزم پاسخ‌دهی در rGO-FETهای بدون گیرنده را نمی‌توان صرفاً به دوپینگ ذاتی کانال نسبت داد. rGO در حالت bare دارای نقص‌های ساختاری، گروه‌های عاملی اکسیژنی و حالت‌های تله‌ای سطحی متعددی است که نقش غالبی در برهم‌کنش با مولکول‌های آنالیت ایفا می‌کنند. جذب مولکول‌های الکترون‌گیرRDX، به‌ویژه در نواحی مجاور تماس‌های فلزی Cr/Au–rGO، می‌تواند منجر به تغییر ارتفاع و پهنای سد شاتکی و همچنین به دام افتادن بار در تله‌های سطحی شود. این فرآیندها موجب ایجاد میدان‌های الکترواستاتیکی موضعی می‌شوند که عملکردی مشابه اعمال یک ولتاژ گیت منفی محلی دارند. در نتیجه، شیفت مشاهده‌شده نقطه

UNCORRECTED PROOF

دیراک به سمت ولتاژهای گیت منفی را نمی‌توان به‌عنوان دوپینگ واقعی n-type در کانال rGO در نظر گرفت؛ بلکه این پدیده به‌طور غالب ناشی از برهم‌کنش‌های وابسته به تماس فلز-rGO و پرشدن حالت‌های تله‌ای سطحی است که منجر به ایجاد میدان‌های الکترواستاتیکی موضعی و یک شیفت ظاهری در مشخصه‌های انتقالی دستگاه می‌شود[18]. این مکانیزم مبتنی بر میدان‌های موضعی، توجیه‌کننده رفتار خطی و تکرارپذیری بالای مشاهده شده در نمودار ۱۳ و ۱۴ است. از آنجا که این تغییرات ناشی از اثرات میدانی سطحی و به‌دام‌افتادن بار است و نه تغییر ساختاری در شبکه کربنی، رفتار دوقطبی دستگاه نیز حفظ شده و تخریبی در عملکرد ترانزیستور رخ نمی‌دهد. این پایداری الکتریکی و برگشت‌پذیری نسبی فرآیند جذب، rGO-FET خالص را به عنوان یک بستر پایه مناسب برای توسعه حسگرهای انتخابی‌تر از طریق functionalization هدفمند با پپتیدها یا گیرنده‌های زیستی معرفی می‌کند؛ به‌گونه‌ای که پاسخ ذاتی کانال می‌تواند با انتخاب‌پذیری شیمیایی ترکیب شود.

۴-۴-پایداری الکتریکی، تکرارپذیری و یکنواختی بین دستگاه‌ها

پایداری الکتریکی بالا و هیسترزیس[۵] ناچیز مشاهده‌شده در منحنی‌های انتقالی و خروجی، نشان‌دهنده تشکیل کانالی با حداقل تله‌های بار سطحی و تماس الکتریکی مؤثر بین الکترودهای Cr/Au و کانال است. کاهش اثرات هیسترزیس، بیانگر آلودگی سطحی اندک و کنترل مناسب شرایط ساخت است که برای عملکرد پایدار در محیط‌های شیمیایی و زیستی اهمیت حیاتی دارد. تغییرات محدود جریان درین در سیکل‌های متوالی اندازه‌گیری، نشان‌دهنده تکرارپذیری بالای پاسخ الکتریکی و حسگری دستگاه‌ها است. چنین پایداری‌ای به‌ویژه در کاربردهای حسگری که در آن‌ها سیگنال خروجی مستقیماً به تغییرات محیطی کوچک وابسته است، یک مزیت اساسی محسوب می‌شود و امکان تشخیص قابل اعتماد و بدون خطا را فراهم می‌کند. اختلافات جزئی مشاهده شده میان دستگاه‌های مختلف را می‌توان عمدتاً به ناهمگنی‌های جزئی در یکنواختی شیت‌های rGO و شرایط تماس الکتریکی نسبت داد. با این حال، سازگاری کلی رفتار انتقالی، موقعیت نقطه دیراک و پاسخ حسگری در تمامی ترانزیستورها نشان می‌دهد که روش محلول‌محور به‌کاررفته از قابلیت تکرارپذیری مناسبی در مقیاس دستگاه برخوردار است. در مجموع، رویکرد محلول‌محور ارائه‌شده ضمن سادگی فرآیند، منجر به ساخت کانال‌هایی یکنواخت با رفتار دوقطبی پایدار و هیسترزیس کم شده است که عملکردی رقابتی با روش‌های پیچیده‌تر را در حسگری pH و RDX ارائه می‌دهد. همسو با یافته‌های ما، مطالعات جدید دیگری نیز موفقیت ساخت حسگرهای مبتنی بر rGO-FET را برای آنالیت‌های شیمیایی پیچیده گزارش کرده‌اند که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان این پلتفرم است[۶].

۴-۵- تحلیل تطبیقی عملکرد rGO-FETهای ارائه شده با گزارش‌های پیشین

به منظور ارزیابی جایگاه عملکرد ترانزیستورهای rGO-FET ارائه‌شده در این پژوهش، نتایج به‌دست‌آمده از دو منظر کیفی و کمی با گزارش‌های پیشین در حوزه حسگرهای مبتنی بر گرافن و اکسید گرافن احیا شده مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده، بسیاری از مطالعات قبلی برای دستیابی به پاسخ حسگری قابل‌قبول، متکی بر فرآیندهای ساخت پیچیده، عامل‌دارکردن شیمیایی انتخابی یا استفاده از گیرنده‌های زیستی[۱۹] بوده‌اند. در مقابل، ساختارهای معرفی‌شده در این کار که با یک روش محلول‌محور ساده و بدون functionalization هدفمند ساخته شده‌اند، رفتار دوقطبی پایدار، هیسترزیس کم، شیفت سیستماتیک و قابل‌تکرار نقطه دیراک و پاسخ حسگری قابل‌توجهی نسبت به تغییرات pH و مولکول RDX از خود نشان داده‌اند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که مکانیزم غالب حسگری در این ساختارها مبتنی بر انتقال بار مستقیم بین آنالیت و کانال rGO است و امکان تحلیل کمی پاسخ حسگری را بدون نیاز به اصلاحات شیمیایی پیچیده فراهم می‌کند. مقایسه تطبیقی نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین بیانگر آن است که رویکرد پیشنهادی، ضمن حفظ سادگی فرآیند ساخت، عملکردی پایدار، تکرارپذیر و قابل رقابت برای کاربردهای حسگری شیمیایی و زیستی ارائه می‌دهد. نوآوری این کار در ارائه یک روش محلول‌محور ساده و مقیاس‌پذیر برای ساخت ترانزیستورهای rGO-FET بدون

UNCORRECTED PROOF

نیاز به functionalization یا گیرنده‌های زیستی پیچیده است، که منجر به کانالی یکنواخت با رفتار دوقطبی پایدار، هیسترزیس کم و پاسخ حسگری قابل‌تکرار نسبت به تغییرات pH و مولکول‌های هدف مانند RDX می‌شود. علاوه بر جنبه‌های کیفی و ساختاری، بررسی پارامترهای کمی کلیدی شامل حساسیت، زمان پاسخ و پایداری دستگاه‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که حسگرهای این پژوهش، عملکرد دینامیکی بسیار مطلوبی دارند؛ به‌طوری‌که نتایج ارائه‌شده نشان‌دهنده عملکرد پایدار، پاسخ سریع و حساسیت بالا در محدوده pH خنثی و قابلیت اعتماد مناسب نسبت به مطالعات پیشین است (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه تطبیقی و کمی عملکرد حسگرهای rGO-FET ارائه‌شده در این پژوهش با گزارش‌های پیشین، شامل پارامترهای ماده فعال، روش ساخت، نوع حسگری، پاسخ حسگری، شیفت نقطه دیراک، پایداری الکتریکی، حساسیت، زمان پاسخ، پایداری و نیاز به functionalization.

مرجع	ماده فعال/ ساختار	روش ساخت	نوع حسگری نوع آنالیت (هدف)	پاسخ حسگری	زمان پاسخ	حساسیت	شیفت نقطه دیراک	پایداری/ هیسترزیس	نیاز به عامل دار کردن	توضیح
[9]	rGO Aptamer	Drop-casting (EGFET)	بیومولکول BDNF (پروتئین)	بالا	۳۰ min	LOD: 10 fM	گزارش شده	۱ روز	بله آپتامر	هزینه ساخت بالا
[20]	graphene	rGO-v FET	یون K^+	متوسط	---	---	گزارش شده	بالا	خیر	هزینه ساخت بالا
[21]	graphene	CVD	pH	متوسط	---	---	گزارش شده	بالا	بله	هزینه ساخت بالا
[22]	RFGFET (rGO)	CVD	pH	متوسط	--	~54 mV/pH	گزارش نشده	~5% drift	خیر	کیفیت بالا، زمان پاسخ کند
[23]	Graphene	CVD	pH	متوسط	10-15 min	~۰.۵ V/ µM شیفت ولتاژی	گزارش نشده	گزارش نشده	بله	هزینه ساخت بالا
این کار	rGO-FET	اسپین کوتینگ محلول محور	RDX	بالا	~8 s	شیفت خطی نقطه دیراک	سیستماتیک و خطی	بالا (بدون تخریب کانال)	خیر	سریع، پایدار، کم‌هزینه
این کار	rGO-FET	اسپین کوتینگ محلول محور	pH	بالا	~5 s	$\Delta I_{DS}/I_{DS0} \approx 25–30\%$ در pH=7)	سیستماتیک و خطی	بسیار بالا (تغییرات <3% در سیکل‌ها) <3% drift	خیر	سریع، پایدار، کم‌هزینه

UNCORRECTED PROOF

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر اکسید گرافن احیا شده (rGO-FETs) با استفاده از یک روش محلول‌محور ساده و بدون نیاز به عامل‌دارکردن شیمیایی انتخابی، طراحی و ساخته شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که کانال‌های rGO یکنواخت، کم‌لایه و با کیفیت بالا شکل گرفته و تماس‌های Cr/Au–rGO رفتار پایدار و اهمی از خود نشان می دهند. مشخصه‌های الکتریکی، بیانگر رفتار دوقطبی پایدار، حداقل هیسترزیس (کمتر از ۳٪)، پایداری جریان درین، تحرک مناسب حامل‌ها و یکنواختی عملکرد بین دستگاه‌ها هستند. این نتایج در مجموع حاکی از تشکیل کانالی با حداقل تله‌های بار سطحی و کیفیت بالای رابط کانال–الکترود است. علاوه بر این، پاسخ حسگری قابل توجه به تغییرات pH و حضور مولکول RDX، همراه با شیفت سیستماتیک و تکرارپذیر نقطه دیراک، توانایی این ساختارها را برای تشخیص کمی و کیفی آنالیت‌های مختلف حتی بدون استفاده از عامل‌های زیستی یا گیرنده‌های پیچیده نشان می‌دهد. این رفتار حاکی از آن است که مکانیزم غالب حسگری در این سامانه مبتنی بر انتقال بار مستقیم بین آنالیت و کانال rGO بوده و امکان تحلیل کمی پاسخ حسگری را بدون نیاز به اصلاحات شیمیایی پیچیده فراهم می‌کند. رابطه تقریباً خطی بین شیفت نقطه دیراک و غلظت RDX، پتانسیل-rGO FETها را به‌عنوان حسگرهای حساس و کمی و بدون برچسب تأیید می‌کند. تمایز اصلی این پژوهش، پر کردن خلأ موجود در شناسایی مولکول‌های پیچیده‌ای مانند RDX با استفاده از یک روش ساخت ساده و بدون نیاز به فرآیندهای پیچیده یا گیرنده‌های زیستی است. نتایج نشان داد که ترانزیستورهای rGO-FET ساخته‌شده با رویکرد محلول‌محور، قادر به تشخیص پایدار و تکرارپذیر این آنالیت‌ها هستند و دستیابی به عملکرد حسگری کمی را بدون نیاز به روش‌های پرهزینه و چندمرحله‌ای ممکن می‌سازند. روش پیشنهادی امکان تولید سریع، اقتصادی و مقیاس‌پذیر حسگرهای فوق‌حساس با عملکرد قابل اعتماد را فراهم می‌کند. در مجموع، نتایج این پژوهش تحقق موفق هدف اصلی یعنی طراحی و ساخت rGO-FETهایی با عملکرد پایدار و قابل اعتماد را تأیید کرده و این ساختارها را به‌عنوان یک پلتفرم پایه و عمومی برای توسعه حسگرهای انتخابی‌تر و پیشرفته‌تر در مطالعات آینده معرفی می‌کند. با توجه به نتایج امیدوارکننده به‌دست‌آمده، این پلتفرم پتانسیل بالایی برای توسعه کاربردهای صنعتی و پژوهشی گسترده‌ای دارد. در حوزه صنعتی، به دلیل سادگی فرآیند ساخت و هزینه پایین تولید، این حسگرها می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای طراحی سیستم‌های هشداردهنده قابل حمل و ارزان برای شناسایی مواد منفجره نیتروآروماتیک (مانند RDX) در مراکز امنیتی، فرودگاه‌ها و اماکن نظامی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، قابلیت تشخیص pH با حساسیت بالا، این ساختارها را برای نظارت بر کیفیت آب و فرآیندهای زیست‌محیطی مناسب می‌سازد. در سطح پژوهشی، این سامانه می‌تواند به عنوان یک بستر عمومی برای ساخت آرایه‌های حسگری الکترونیکی (Electronic Noses) جهت تشخیص الگوهای پیچیده شیمیایی و زیستی به کار رود. علاوه بر این، پتانسیل بالای این ساختار برای عامل‌دار کردن با گیرنده‌های زیستی خاص (مانند آنتی‌بادی‌ها یا آپتامرها)، مسیر را برای توسعه حسگرهای بسیار انتخابی برای تشخیص بیماری‌ها و بیومارکرهای خاص در مقیاس نانو هموار می‌کند.

۶- محدودیت‌های پژوهش

با وجود نتایج امیدوارکننده و عملکرد مناسب حسگرهای طراحی‌شده، این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است که در ادامه ذکر می‌شوند. نخست، اگرچه ساختارهای rGO-FET بدون نیاز به عامل‌دار کردن به مولکول‌های RDX پاسخ دادند، اما انتخاب‌پذیری (Selectivity) در برابر سایر ترکیبات نیتروآروماتیک یا تداخل‌های شیمیایی احتمالی در محیط‌های پیچیده، نیازمند بررسی‌های بیشتر است. دوم، پایداری بلندمدت دستگاه‌ها در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت بالا و تغییرات دمایی شدید، در این مطالعه به صورت کوتاه‌مدت ارزیابی شد و برای کاربردهای تجاری نیازمند تست‌های پایداری طولانی‌مدت (Long-term stability) است. سوم، فرآیند اسپین‌کوتینگ اگرچه ساده است، اما ممکن است در مقیاس‌های بسیار بزرگ صنعتی چالش‌های یکنواختی داشته باشد که نیازمند بهینه‌سازی‌های مهندسی است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود در کارهای آینده بر روی عامل‌دار کردن سطح rGO با پپتیدها

UNCORRECTED PROOF

یا پلیمرهای خاص برای افزایش انتخاب‌پذیری تمرکز شود. همچنین، استفاده از لایه‌های محافظ نفوذناپذیر (Passivation layers) می‌تواند پایداری دستگاه‌ها در محیط‌های مختلف را بهبود بخشد. علاوه بر این، توسعه آرایه‌های حسگری (Sensor Arrays) و استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای تحلیل الگوهای پاسخ، می‌تواند دقت تشخیص را در محیط‌های واقعی افزایش دهد. همچنین رویکردهای نوین مانند استفاده از شبکه‌های عصبی گرافی اسپایکینگ (SGNN) برای طراحی و بهینه‌سازی حسگرهای FET شیمیایی پیشنهاد شده‌اند که می‌توانند عملکرد و حساسیت این حسگرها را افزایش دهند[۲۴].

مراجع

[۱] Alimohammadzadeh, Elmira, and John Hedley. "Advances in graphene field effect transistors (FETs) for amine neurotransmitter sensing." *Applied Sciences* 14, no. 22 (2024): 10109.

[۲] Béraud, Anouk, Madline Sauvage, Claudia M Bazán, Monique Tie, Amira Bencherif, and Delphine Bouilly. "Graphene field-effect transistors as bioanalytical sensors: Design, operation and performance." *Analyst* 146, no. 2 (2021): 403-428.

[۳] Han, Yulin, Xinya Lu, Ningning Su, Yingjie Zhao, and Qingyan Pan. "Graphene-Skinned Materials: Direct Integration Strategies, Structural Insights, and Multifunctional Applications." *Nanomaterials* 15, no. 21 (2025): 1679.

[۴] Hutapea, Joys Alisa Angelina, Yosia Gopas Oetama Manik, Sun Theo Constan Lotebulo Ndruru, Jingfeng Huang, Ronn Goei, Alfred Iing Yoong Tok, and Rikson Siburian. *Comprehensive review of graphene synthesis techniques: Advancements, challenges, and future directions*. in *Micro*. 2025. MDPI.

[۵] Krishnan, Siva Kumar, Nandini Nataraj, M Meyyappan, and Umapada Pal. "Graphene-based field-effect transistors in biosensing and neural interfacing applications: recent advances and prospects." *Analytical Chemistry* 95, no. 5 (2023): 2590-2622.

[۶] Candia, Melody L, Esteban Piccinini, Omar Azzaroni, and Waldemar A Marmisollé. "Creatinine Sensing with Reduced Graphene Oxide-Based Field Effect Transistors." *Chemosensors* 14, no. 1 (2025): 3.

[۷] Aftab, Sikandar, Muhammad Zahir Iqbal, Sajjad Hussain, and Hosameldin Helmy Hegazy. "Recent Advances in Nanomaterials-Based FETs for SARS-CoV-2 (COVID-19 Virus) Diagnosis." *Advanced Functional Materials* 33, no. 26 (2023): 2301007.

[۸] Mshelia, Suleman Stephen, Preeti Jain, and Manju Gaur. "Graphene oxide-based smart sensors: Synthesis, functionalization strategies, and biosensing applications." *Nano-Structures & Nano-Objects* 43, no. (2025): 101532.

[۹] Salehirozveh, Mostafa, Robin Bonné, Peeyush Kumar, Farbod Abazar, Parisa Dehghani, Ivan Mijakovic, and Vellaisamy AL Roy. "Enhanced detection of Brain-Derived Neurotrophic Factor (BDNF) using a reduced graphene oxide field-effect transistor aptasensor." *Nanoscale* 17, no. 8 (2025): 4543-4555.

[۱۰] To, Ka Chuen, Sultan Ben-Jaber, and Ivan P Parkin. "Recent developments in the field of explosive trace detection." *ACS nano* 14, no. 9 (2020): 10804-10833.

UNCORRECTED PROOF

[۱۱] Masoumi, Saeid. " Clean, crackless and selective transfer of graphene using reduced graphene oxide and graphene sheet with APTES layers on silicon substrates," *Journal of Modeling in Engineering*, in press, (2025): ,doi: 10.22075/JME.2025.39805.2935.

[۱۲] Tian, JF, Luis A Jauregui, Gabriel Lopez, Helin Cao, and Yong P Chen. "Ambipolar graphene field effect transistors by local metal side gates." *Applied Physics Letters* 96, no. 26 (2010).

[۱۳] Cai, Qian, Jiachi Ye, Belal Jahannia, Hao Wang, Chandraman Patil, Rasul Al Foysal Redoy, Abdulrahman Sidam, *et al.* "Comprehensive study and design of graphene transistor." *Micromachines* 15, no. 3 (2024): 406.

[۱۴] Giambra, Marco A, Antonio Benfante, Riccardo Pernice, Vaidotas Miseikis, Filippo Fabbri, Christian Reitz, Wolfram HP Pernice, *et al.* "Graphene field-effect transistors employing different thin oxide films: a comparative study." *ACS omega* 4, no. 1 (2019): 2256-2260.

[۱۵] Sreejith, S, J Ajayan, JM Radhika, B Sivasankari, Shubham Tayal, and M Saravanan. "A comprehensive review on graphene FET bio-sensors and their emerging application in DNA/RNA sensing & rapid Covid-19 detection." *Measurement* 206, no. (2023): 112202.

[۱۶] El Grour Tarek, Najari Montassar, and Mehdi Akermi. "Graphene field-effect transistor for pH sensing application: Compact modelling and simulation study." no. (2018).

[۱۷] Kammarchedu, Vinay, Heshmat Asgharian, Keren Zhou, Pouya Soltan Khamsi, and Aida Ebrahimi. "Recent advances in graphene-based electroanalytical devices for healthcare applications." *Nanoscale* 16, no. 27 (2024): 12857-12882.

[۱۸] Bharathi, Ganapathi, and Seongin Hong. "Gate Engineering in Two-Dimensional (2D) Channel FET Chemical Sensors: A Comprehensive Review of Architectures, Mechanisms, and Materials." *Chemosensors* 13, no. 6 (2025): 217.

[۱۹] Wang, Yao-Tung, Arvind Mukundan, Riya Karmakar, Tsung-Hsien Chen, Hardik Dhiman, Fan-Min Lin, and Hsiang-Chen Wang. "A comprehensive review of graphene-based biosensors: Fabrication, applications, characterization and future perspectives—A review." *APL bioengineering* 9, no. 3 (2025).

[۲۰] Nimisha, Avik Sett, Virendra Kumar Tewari, and Tarun Kanti Bhattacharyya. "Soil Potassium Sensor Using a Valinomycin-Decorated Reduced Graphene Oxide (rGO-v)-Based Field-Effect Transistor for Precision Farming." *ACS Agricultural Science & Technology* 4, no. 10 (2024).۱۱۱۲-۱۱۱۹ :

[۲۱] Sohn, Il-Yung, Duck-Jin Kim, Jin-Heak Jung, Ok Ja Yoon, Tien Nguyen Thanh, Trung Tran Quang, and Nae-Eung Lee. "pH sensing characteristics and biosensing application of solution-gated reduced graphene oxide field-effect transistors." *Biosensors and Bioelectronics* 45, no. (2013): 70-76.

[۲۲] Jang, Hyun-June, Xiaoyu Sui, Wen Zhuang, Xiaodan Huang, Min Chen, Xiaolei Cai, Yale Wang, *et al.* "Remote floating-gate field-effect transistor with 2-dimensional reduced graphene oxide sensing layer for reliable detection of SARS-CoV-2 spike proteins." *ACS applied materials & interfaces* 14, no. 21 (2022): 24187-24196.

[۲۳] Wang, Ying, Yuyan Shao, Dean W Matson, Jinghong Li, and Yuehe Lin. "Nitrogen-doped graphene and its application in electrochemical biosensing." *ACS nano* 4, no. 4 (2010): 1790-1798.

[۲۴] Ferreira, Rodrigo P, Rui Ding, Fengxue Zhang, Haihui Pu, Claire Donnat, Yuxin Chen, and Junhong Chen. "Expediting field-effect transistor chemical sensor design with neuromorphic spiking graph neural networks." *Molecular Systems Design & Engineering* 10, no. 5 (2025): 345-356.

UNCORRECTED PROOF